

Sumari

SUMARI	1
A. CÀLCULS	3
A.1 Temperatura de la flama	3
A.2 Cicles de Rankine	4
A.3 Aprofitador de la calor dels fums	14
A.4 Càlcul del ventilador per l'aire i el fum	22
B. PLÀNOLS I ESQUEMES	23
B.1 Esquema de la instal·lació	23
B.2 Detall de l'aprofitador de calor de fums	26
B.3 Diagrama de fluxos	28





A. Càlculs

A.1 Temperatura de la flama

A continuació es detallen els càlculs realitzats per tal d'obtenir la temperatura de flama a la combustió de la caldera. Per fer-ho, cal caracteritzar un volum de control en el que es realitza un balanç d'energia entre dos punts: entrada i sortida.

Es considera a l'entrada l'aire (tenint en compte l'excés), a 527 °C (800 K), a pressió atmosfèrica i el combustible assecat. A la sortida (just després de la combustió però abans de cedir calor al mercuri) es considera CO₂, aire (l'excés introduït que no s'ha cremat), vapor d'aigua i N₂ (la part de l'aire estequiomètric que no es crema). Tots aquests gasos de sortida es troben a la temperatura de flama.

És important remarcar que altres gasos de sortida no es tenen en compte en aquests càlculs ja que la seva quantitat no és molt important i es poden menysprear per tal de facilitar els càlculs. Alguns d'aquests gasos són SO₂ i NO_x. Tot i això, aquests gasos són contaminants i s'han de tractar, tal com s'explica a l'apartat 6.7 de la memòria.

El balanç energètic realitzat és el següent:

$$h_{\text{aire entrada}}(T_{\text{aire entrada}}) \cdot n_{\text{aire entrada}} + \text{PCI} \cdot m_{\text{combustible}} = h_{\text{CO}_2}(T_{\text{flama}}) \cdot n_{\text{CO}_2} + h_{\text{aire sortida}}(T_{\text{flama}}) \cdot n_{\text{aire sortida}} + h_{\text{vapor d'aigua}}(T_{\text{flama}}) \cdot n_{\text{vapor d'aigua}} + h_{\text{N}_2}(T_{\text{flama}}) \cdot n_{\text{N}_2} \quad (\text{Eq. A.1})$$

on:

$$T_{\text{aire entrada}} = 527 \text{ °C} = 800 \text{ K}$$

$$n_{\text{aire entrada}} = 17134,93 \text{ kmol/dia}$$

$$\text{PCI} = 16720 \text{ kJ/kg (dada proporcionada per la granja estudiada)}$$

$$m_{\text{combustible}} = 34000 \text{ kg/dia}$$

$$n_{\text{CO}_2} = 2323,33 \text{ kmol/dia}$$

$$n_{\text{aire sortida}} = 5140,48 \text{ kmol/dia}$$

$$n_{\text{aigua}} = 2550 \text{ kmol/dia}$$

$$n_{\text{N}_2} = 13536,6 \text{ kmol /dia}$$

Els fluxos molars estan calculats a l'apartat 6.3 de la memòria.



Degut a que l'entalpia (h) de cada gas depèn de la temperatura en què es troba i en aquest cas la temperatura de flama és la incògnita buscada, s'ha de plantejar l'equació de l'entalpia de cada gas en funció de la T_{flama} i solucionar el sistema d'equacions corresponent.

$$h(T) = R \cdot T \cdot (a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3 + a_5 \cdot T^4 + a_6 / T) \quad (\text{Eq. A.2})$$

on:

$$R = 8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

Suposant $T_{flama} > 1000 \text{ K}$, es té:

Gas	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
CO ₂	4,636	$2,741 \cdot 10^{-3}$	$-9,959 \cdot 10^{-7}$	$1,604 \cdot 10^{-10}$	$-9,162 \cdot 10^{-15}$	-49024,904
Aire	3,088	$1,246 \cdot 10^{-3}$	$-4,237 \cdot 10^{-7}$	$6,748 \cdot 10^{-11}$	$-3,971 \cdot 10^{-15}$	-995,263
Aigua	2,677	$2,973 \cdot 10^{-3}$	$-7,738 \cdot 10^{-7}$	$9,443 \cdot 10^{-11}$	$-4,269 \cdot 10^{-15}$	-29885,894
N ₂	2,952	$1,397 \cdot 10^{-3}$	$-4,926 \cdot 10^{-7}$	$7,860 \cdot 10^{-11}$	$-4,607 \cdot 10^{-15}$	-923,937

Fig. A.1 ____ Taula dels coeficients per al càlcul de les entalpies de cada gas.

Resolent el sistema de 5 equacions i 5 incògnites s'obté el valor de la T_{flama} que és igual a **2747,6°C (3020,7 K)**. Aquesta temperatura de flama és la teòrica que hauria d'obtenir-se a la combustió però degut sobretot a pèrdues de radiació cap a les parets de la caldera es considera que la temperatura real de flama és uns 400°C més petita, és a dir d'uns **2347,6°C (2620,7 K)**.

A.2 Cicles de Rankine

Per a realitzar els càlculs de les diferents potències es necessita fixar els diferents punts de cada cicle. Els punts estan marcats per la pressió, la temperatura, l'entalpia i l'entropia. Les dades del mercuri s'han trobat a [2], les del Dowtherm-A han estat cedides per l'empresa Dow Chemical, les de l'aigua s'han extret de [1] i les del R-365mfc s'han obtingut gràcies a [8]. A continuació es mostren els punts i els resultats obtinguts:



CÀLCUL DELS DIFERENTS CICLES

Q_{fums} (kW)	9375,97	Q_{mercuri} (kW)	8492,74	$Q_{\text{reescalfament aigua}}$ (kW)	883,23
------------------------	---------	---------------------------	---------	---------------------------------------	--------

CICLE DE MERCURI					
Cicle ideal					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	397,12	Temperatura (°C)	400	Temperatura (°C)	560,6
Pressió (bar)	2	Pressió (bar)	16	Pressió (bar)	16
Volum Específic (m ³ /kg)	7,91E-05	Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)	8,19E-05
Entalpia (kJ/kg)	97,332	Entalpia (kJ/kg)	100,000	Entalpia (kJ/kg)	119,996
Entropia (kJ/(kg·K))	0,48928	Entropia (kJ/(kg·K))	0,48928	Entropia (kJ/(kg·K))	0,51937

Cicle real					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	397,12	Temperatura (°C)	400	Temperatura (°C)	560,6
Pressió (bar)	2	Pressió (bar)	16	Pressió (bar)	16
Volum Específic (m ³ /kg)	7,91E-05	Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)	8,19E-05
Entalpia (kJ/kg)	97,332	Entalpia (kJ/kg)	100,000	Entalpia (kJ/kg)	119,996
Entropia (kJ/(kg·K))	0,48928	Entropia (kJ/(kg·K))	0,48928	Entropia (kJ/(kg·K))	0,51937

Punt 3'		Punt 3	
Temperatura (°C)	560,6	Temperatura (°C)	900
Pressió (bar)	16	Pressió (bar)	16
Volum Específic (m ³ /kg)	0,01933	Volum Específic (m ³ /kg)	0,03014
Entalpia (kJ/kg)	406,037	Entalpia (kJ/kg)	442,043
Entropia (kJ/(kg·K))	0,86245	Entropia (kJ/(kg·K))	0,89869

Punt 3'		Punt 3	
Temperatura (°C)	560,6	Temperatura (°C)	900
Pressió (bar)	16	Pressió (bar)	16
Volum Específic (m ³ /kg)	0,01933	Volum Específic (m ³ /kg)	0,03014
Entalpia (kJ/kg)	406,037	Entalpia (kJ/kg)	442,043
Entropia (kJ/(kg·K))	0,86245	Entropia (kJ/(kg·K))	0,89869



Cicle ideal			
Punt 4t		Punt 4'	
Temperatura (°C)	397,12	Temperatura (°C)	397,120
Pressió (bar)	2	Pressió (bar)	2
Volum Específic (m ³ /kg)	0,13001	Volum Específic (m ³ /kg)	0,13888
Entalpia (kJ/kg)	371,911	Entalpia (kJ/kg)	390,737
Entropia (kJ/(kg·K))	0,89869	Entropia (kJ/(kg·K))	0,92676

Cicle real			
Punt 4p		Punt 4'	
Temperatura (°C)	418,7	Temperatura (°C)	397,120
Pressió (bar)	2	Pressió (bar)	2
Volum Específic (m ³ /kg)	0,17862	Volum Específic (m ³ /kg)	0,13888
Entalpia (kJ/kg)	392,951	Entalpia (kJ/kg)	390,737
Entropia (kJ/(kg·K))	0,93046	Entropia (kJ/(kg·K))	0,92676

$\eta(\text{turbina})$	0,7
------------------------	-----

$m_{\text{Hg}} \text{ (kg/s)}$	24,991
--------------------------------	--------

$P_{\text{turb}} \text{ (kW)}$	1226,877
--------------------------------	----------

$Q_{\text{desc}} \text{ (kW)}$	7332,539
--------------------------------	----------

$P_{\text{bomba}} \text{ (kW)}$	66,676
---------------------------------	--------

r_p	8
-------	---



CICLE DE DOWTHERM A

Cicle ideal					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	257	Temperatura (°C)	260	Temperatura (°C)	390
Pressió (bar)	1	Pressió (bar)	9,5	Pressió (bar)	9,5
Volum Específic (m ³ /kg)	0,01333	Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)	0,01176
Entalpia (kJ/kg)	465	Entalpia (kJ/kg)	470	Entalpia (kJ/kg)	780
Entropia (kJ/(kg·K))	2,83	Entropia (kJ/(kg·K))	2,83	Entropia (kJ/(kg·K))	3,35

Cicle real					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	257	Temperatura (°C)	260	Temperatura (°C)	390
Pressió (bar)	1	Pressió (bar)	9,5	Pressió (bar)	9,5
Volum Específic (m ³ /kg)	0,01333	Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)	0,01176
Entalpia (kJ/kg)	465	Entalpia (kJ/kg)	470	Entalpia (kJ/kg)	780
Entropia (kJ/(kg·K))	2,83	Entropia (kJ/(kg·K))	2,83	Entropia (kJ/(kg·K))	3,35

Punt 3'		Punt 4t	
Temperatura (°C)	390	Temperatura (°C)	340
Pressió (bar)	9,5	Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,025	Volum Específic (m ³ /kg)	0,28571
Entalpia (kJ/kg)	995	Entalpia (kJ/kg)	935
Entropia (kJ/(kg·K))	3,68	Entropia (kJ/(kg·K))	3,68

Punt 3'		Punt 4p	
Temperatura (°C)	390	Temperatura (°C)	355
Pressió (bar)	9,5	Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,025	Volum Específic (m ³ /kg)	0,30303
Entalpia (kJ/kg)	995	Entalpia (kJ/kg)	953,000
Entropia (kJ/(kg·K))	3,68	Entropia (kJ/(kg·K))	3,72000



Cicle ideal	
Punt 4'	
Temperatura (°C)	257
Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,23529
Entalpia (kJ/kg)	760
Entropia (kJ/(kg·K))	3,38

Cicle real	
Punt 4'	
Temperatura (°C)	257
Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,23529
Entalpia (kJ/kg)	760
Entropia (kJ/(kg·K))	3,38

$\eta(\text{turbina})$	0,7
------------------------	-----

$m_{\text{DW-A}} \text{ (kg/s)}$	22,086
----------------------------------	--------

$P_{\text{turb}} \text{ (kW)}$	927,610
--------------------------------	---------

$Q_{\text{besc}} \text{ (kW)}$	6515,359
--------------------------------	----------

$P_{\text{bomba}} \text{ (kW)}$	110,430
---------------------------------	---------

r_p	9,5
-------	-----



CICLE DE L'AIGUA					
Cicle ideal					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	143,62	Temperatura (°C)	144	Temperatura (°C)	250,33
Pressió (bar)	4	Pressió (bar)	40	Pressió (bar)	40
Volum Específic (m ³ /kg)	1,0836	Volum Específic (m ³ /kg)	1,08E-03	Volum Específic (m ³ /kg)	1,25E-03
Entalpia (kJ/kg)	604,67	Entalpia (kJ/kg)	608,080	Entalpia (kJ/kg)	0,000
Entropia (kJ/(kg·K))	1,7764	Entropia (kJ/(kg·K))	1,7764	Entropia (kJ/(kg·K))	2,7965

Cicle real					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	143,62	Temperatura (°C)	144	Temperatura (°C)	250,33
Pressió (bar)	4	Pressió (bar)	40	Pressió (bar)	40
Volum Específic (m ³ /kg)	1,0836	Volum Específic (m ³ /kg)	1,08E-03	Volum Específic (m ³ /kg)	1,25E-03
Entalpia (kJ/kg)	604,67	Entalpia (kJ/kg)	608,080	Entalpia (kJ/kg)	0
Entropia (kJ/(kg·K))	1,7764	Entropia (kJ/(kg·K))	1,7764	Entropia (kJ/(kg·K))	2,7965

Punt 3'		Punt 3	
Temperatura (°C)	250,33	Temperatura (°C)	350
Pressió (bar)	40	Pressió (bar)	40
Volum Específic (m ³ /kg)	0,04978	Volum Específic (m ³ /kg)	0,06641
Entalpia (kJ/kg)	2800,300	Entalpia (kJ/kg)	3095,1
Entropia (kJ/(kg·K))	6,0685	Entropia (kJ/(kg·K))	6,587

Punt 3'		Punt 3	
Temperatura (°C)	250,33	Temperatura (°C)	350
Pressió (bar)	40	Pressió (bar)	40
Volum Específic (m ³ /kg)	0,04978	Volum Específic (m ³ /kg)	0,06641
Entalpia (kJ/kg)	2800,3	Entalpia (kJ/kg)	3095,1
Entropia (kJ/(kg·K))	6,0685	Entropia (kJ/(kg·K))	6,587



Cicle ideal			
Punt 4t		Punt 4'	
Temperatura (°C)	143,62	Temperatura (°C)	143,620
Pressió (bar)	4	Pressió (bar)	4,000
Volum Específic (m³/kg)	0,43479	Volum Específic (m³/kg)	0,4625
Entalpia (kJ/kg)	2609,532	Entalpia (kJ/kg)	2737,600
Entropia (kJ/(kg·K))	6,587	Entropia (kJ/(kg·K))	6,89430

Cicle real			
Punt 4p		Punt 4'	
Temperatura (°C)	151,45	Temperatura (°C)	143,620
Pressió (bar)	4	Pressió (bar)	4,000
Volum Específic (m³/kg)	0,4828	Volum Específic (m³/kg)	0,4625
Entalpia (kJ/kg)	2755,202	Entalpia (kJ/kg)	2737,600
Entropia (kJ/(kg·K))	6,9359	Entropia (kJ/(kg·K))	6,89430

$\eta(\text{turbina})$	0,7
------------------------	-----

$m_{\text{aigua}} \text{ (kg/s)}$	2,996
-----------------------------------	-------

$P_{\text{turb}} \text{ (kW)}$	1018,365
--------------------------------	----------

$Q_{\text{besc}} \text{ (kW)}$	6390,459
--------------------------------	----------

$P_{\text{bomba}} \text{ (kW)}$	10,217
---------------------------------	--------

r_p	10
-------	----



CICLE DE R-365mfc					
Cicle ideal					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	46,06	Temperatura (°C)	47	Temperatura (°C)	130
Pressió (bar)	1,2	Pressió (bar)	11,32	Pressió (bar)	11,32
Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)	
Entalpia (kJ/kg)	264,87	Entalpia (kJ/kg)	266,000	Entalpia (kJ/kg)	398,950
Entropia (kJ/(kg·K))	1,2199	Entropia (kJ/(kg·K))	1,2199	Entropia (kJ/(kg·K))	1,5881

Cicle real					
Punt 1		Punt 2		Punt 2'	
Temperatura (°C)	46,06	Temperatura (°C)	47	Temperatura (°C)	130
Pressió (bar)	1,2	Pressió (bar)	11,32	Pressió (bar)	11,32
Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)		Volum Específic (m ³ /kg)	
Entalpia (kJ/kg)	264,87	Entalpia (kJ/kg)	266	Entalpia (kJ/kg)	398,95
Entropia (kJ/(kg·K))	1,2199	Entropia (kJ/(kg·K))	1,2199	Entropia (kJ/(kg·K))	1,5881

Punt 3'		Punt 4t	
Temperatura (°C)	390	Temperatura (°C)	340
Pressió (bar)	9,5	Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,025	Volum Específic (m ³ /kg)	0,28571
Entalpia (kJ/kg)	995	Entalpia (kJ/kg)	935
Entropia (kJ/(kg·K))	3,68	Entropia (kJ/(kg·K))	3,68

Punt 3'		Punt 4p	
Temperatura (°C)	390	Temperatura (°C)	355
Pressió (bar)	9,5	Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,025	Volum Específic (m ³ /kg)	0,30303
Entalpia (kJ/kg)	995	Entalpia (kJ/kg)	953,000
Entropia (kJ/(kg·K))	3,68	Entropia (kJ/(kg·K))	3,72000



Cicle ideal	
Punt 4'	
Temperatura (°C)	257
Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,23529
Entalpia (kJ/kg)	760
Entropia (kJ/(kg·K))	3,38

Cicle real	
Punt 4'	
Temperatura (°C)	257
Pressió (bar)	1
Volum Específic (m ³ /kg)	0,23529
Entalpia (kJ/kg)	760
Entropia (kJ/(kg·K))	3,38

$\eta(\text{turbina})$	0,7
------------------------	-----

$m_{R-365mfc}$ (kg/s)	29,294
-----------------------	--------

P_{turb} (kW)	869,659
------------------------	---------

Q_{besc} (kW)	5553,902
------------------------	----------

P_{bomba} (kW)	33,103
-------------------------	--------

r_p	9,4333333
-------	-----------



QUADRE RESUM DELS CICLES

Q_{fums} (kW)	9375,97
-----------------	---------

$P_{turbmercuri}$ (kW)	1226,877
$P_{turbDW-A}$ (kW)	927,610
$P_{turbaiquai}$ (kW)	1018,365
$P_{turbR-365mfc}$ (kW)	869,659

$P_{bombamercuri}$ (kW)	66,676
$P_{bombaDW-A}$ (kW)	110,430
$P_{bombaaiquai}$ (kW)	10,217
$P_{bombaR-365mfc}$ (kW)	33,103

$P_{total\ tubines}$ (kW)	4042,512
---------------------------	----------

P_{bombes}	220,426
--------------	---------

AIGUA DE REFRIGERACIÓ	
Q_{besc} (kW)	5553,902
Pressió (bar)	1
T_{ent} (°C)	13
h_{ent} (kJ/kg)	54,548
T_{sort} (°C)	18
h_{sort} (kJ/kg)	75,528
$m_{aigua\ refrigeració}$ (kg/s)	264,7236

Rendiment mecànic dels cicles	40,76%	tenint en compte el consum de les bombes
--------------------------------------	---------------	--

Rendiment elèctric	97,00%
--------------------	--------

Rendiment global de la instal·lació	39,54%
--	---------------

Fig. A.2___ Taules dels càlculs dels diferents cicles de Rankine



A.3 Aprofitador de la calor dels fums

A continuació es presenten els càlculs realitzats per calcular l'aprofitador de la calor dels fums.

S'ha de dir que les dades de l'aigua i del mercuri s'han trobat a [1], les del mercuri a [2] i les de Dowtherm-A a la documentació donada per Dow Chemical. Pel que fa a les dades dels fums, aquestes s'han aconseguit en el departament de màquines i motors tèrmics de l'ETSEIB.

INTERCANVI DE CALOR AIRE-FUMS

PART DE L'AIRE

Fluid tèrmic: AIGUA

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	20
C _{pent} (kJ/(kmol·K))	29,08
T _{sort} (°C)	50
C _{p_{sort}} (kJ/(kmol·K))	29,13
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,386726
flux màssic (kg/s)	11,40841
Q intercanviada (kW)	343,6253

AIGUA	
P (bar)	0,2
T _{aigua} (°C)	60
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2609,7
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	251,09
flux màssic (kg/s)	0,14568973

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	50
C _{pent} (kJ/(kmol·K))	29,13
T _{sort} (°C)	80
C _{p_{sort}} (kJ/(kmol·K))	29,2
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,386726
flux màssic (kg/s)	11,40841
Q intercanviada (kW)	347,5157

AIGUA	
P (bar)	0,7
T _{aigua} (°C)	90
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2660,1
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	376,94
flux màssic (kg/s)	0,15220822



AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	80
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	29,2
T _{sort} (°C)	110
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	29,29
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,3867259
flux màssic (kg/s)	11,408413
Q intercanviada (kW)	352,10229

AIGUA	
P (bar)	1,99
T _{aigua} (°C)	120
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2706
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	503,72
flux màssic (kg/s)	0,159880799

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	110
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	29,29
T _{sort} (°C)	150
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	29,43
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,3867259
flux màssic (kg/s)	11,408413
Q intercanviada (kW)	475,98991

AIGUA	
P (bar)	6,18
T _{aigua} (°C)	160
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2756,7
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	675,47
flux màssic (kg/s)	0,228706059

Fluid tèrmic:	DOWTHERM-A
---------------	------------

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	150
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	29,43
T _{sort} (°C)	190
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	29,603
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,386726
flux màssic (kg/s)	11,40841
Q intercanviada (kW)	486,23

DOWTHERM-A	
P (bar)	0,3
T _{dowtherm-a} (°C)	200
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	680
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	360
flux màssic (kg/s)	1,51946883



AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	190
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	29,603
T _{sort} (°C)	230
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	29,806
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,386726
flux màssic (kg/s)	11,40841
Q intercanviada (kW)	497,418

DOWTHERM-A	
P (bar)	0,8
T _{dowtherm-a} (°C)	240
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	750
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	440
flux màssic (kg/s)	1,60457421

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	230
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	29,806
T _{sort} (°C)	270
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	30,03
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,3867259
flux màssic (kg/s)	11,408413
Q intercanviada (kW)	508,10827

DOWTHERM-A	
P (bar)	1,8
T _{dowtherm-a} (°C)	280
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	810
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	520
flux màssic (kg/s)	1,752097472

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	270
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	30,03
T _{sort} (°C)	315
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	30,29
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,3867259
flux màssic (kg/s)	11,408413
Q intercanviada (kW)	581,72463

DOWTHERM-A	
P (bar)	2,7
T _{dowtherm-a} (°C)	325
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	885
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	615
flux màssic (kg/s)	2,154535653



Fluid tèrmic:	MERCURI
---------------	---------

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	315
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	30,29
T _{sort} (°C)	350
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	30,51
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,386726
flux màssic (kg/s)	11,40841
Q intercanviada (kW)	462,9921

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	350
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	30,51
T _{sort} (°C)	385
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	30,737
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,386726
flux màssic (kg/s)	11,40841
Q intercanviada (kW)	470,7289

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	385
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	30,737
T _{sort} (°C)	420
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	30,981
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,386726
flux màssic (kg/s)	11,40841
Q intercanviada (kW)	481,43

MERCURI	
P (bar)	1,063
T _{mercuri} (°C)	360
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	386,991
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	92,215
flux màssic (kg/s)	1,57065723

MERCURI	
P (bar)	1,922
T _{mercuri} (°C)	395
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	390,48
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	96,983
flux màssic (kg/s)	1,60386271

MERCURI	
P (bar)	3,299
T _{mercuri} (°C)	430
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	393,923
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	101,775
flux màssic (kg/s)	1,64789759



AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	420
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	30,981
T _{sort} (°C)	455
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	31,216
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,3867259
flux màssic (kg/s)	11,408413
Q intercanviada (kW)	485,50143

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	455
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	31,216
T _{sort} (°C)	490
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	31,46
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,3867259
flux màssic (kg/s)	11,408413
Q intercanviada (kW)	494,51872

AIRE	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	490
c _{pent} (kJ/(kmol·K))	31,46
T _{sort} (°C)	527
c _{psort} (kJ/(kmol·K))	31,71
massa molecular (kg/kmol)	29,5
flux molar (kmol/s)	0,3867259
flux màssic (kg/s)	11,408413
Q intercanviada (kW)	527,50179

MERCURI	
P (bar)	5,3325
T _{mercuri} (°C)	465
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	396,79
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	106,6
flux màssic (kg/s)	1,673046741

MERCURI	
P (bar)	8,222
T _{mercuri} (°C)	500
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	400,579
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	111,463
flux màssic (kg/s)	1,710450893

MERCURI	
P (bar)	12,9
T _{mercuri} (°C)	540
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	404,218
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	117,078
flux màssic (kg/s)	1,837089207



PART DELS FUMS

Fluid tèrmic: MERCURI

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	660
T_{sort} (°C)	619,1039
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	527,5018

MERCURI	
P (bar)	12,9
T _{Hg} (°C)	540
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	404,218
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	117,078
flux màssic (kg/s)	1,83708921

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	619,1039
T_{sort} (°C)	580,765
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	494,5187

MERCURI	
P (bar)	8,222
T _{Hg} (°C)	500
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	400,579
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	111,463
flux màssic (kg/s)	1,71045089

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	580,765
T_{sort} (°C)	543,1251
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	485,5014

MERCURI	
P (bar)	5,3325
T _{Hg} (°C)	465
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	396,79
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	106,6
flux màssic (kg/s)	1,67304674

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	543,12515
T_{sort} (°C)	505,80094
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	481,42998

MERCURI	
P (bar)	3,299
T _{Hg} (°C)	430
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	393,923
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	101,775
flux màssic (kg/s)	1,647897586



FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	505,80094
T_{sort} (°C)	469,30637
c _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	470,72889

MERCURI	
P (bar)	1,922
T _{Hg} (°C)	395
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	390,48
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	96,983
flux màssic (kg/s)	1,603862708

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	469,30637
T_{sort} (°C)	433,41162
c _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	462,99206

MERCURI	
P (bar)	1,063
T _{Hg} (°C)	360
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	386,991
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	92,215
flux màssic (kg/s)	1,57065723

Fluid tèrmic:	DOWTHERM-A
---------------	------------

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	433,4116
T_{sort} (°C)	388,3118
c _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	581,7246

DOWTHERM-A	
P (bar)	2,7
T _{dowtherm-A} (°C)	325
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	885
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	615
flux màssic (kg/s)	2,15453565

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	388,3118
T_{sort} (°C)	348,9193
c _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	508,1083

DOWTHERM-A	
P (bar)	1,8
T _{dowtherm-A} (°C)	280
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	810
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	520
flux màssic (kg/s)	1,75209747



FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	348,91928
T_{sort} (°C)	310,35556
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	497,418

DOWTHERM-A	
P (bar)	0,8
T _{dowtherm-A} (°C)	240
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	750
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	440
flux màssic (kg/s)	1,604574207

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	310,35556
T_{sort} (°C)	272,65922
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	486,23003

DOWTHERM-A	
P (bar)	0,3
T _{dowtherm-A} (°C)	200
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	680
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	360
flux màssic (kg/s)	1,519468829

Fluid tèrmic:	AIGUA
---------------	-------

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	272,6592
T_{sort} (°C)	235,7568
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	475,9899

AIGUA	
P (bar)	6,18
T _{aigua} (°C)	160
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2756,7
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	675,47
flux màssic (kg/s)	0,22870606

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	235,7568
T_{sort} (°C)	208,4591
C _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	352,1023

AIGUA	
P (bar)	1,99
T _{aigua} (°C)	120
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2706
h _{liquid saturat} (kJ/kg)	503,72
flux màssic (kg/s)	0,1598808



FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	208,45906
T_{sort} (°C)	181,51693
c _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	347,51572

AIGUA	
P (bar)	0,7
T _{aigua} (°C)	90
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2660,1
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	376,94
flux màssic (kg/s)	0,152208219

FUMS	
P (bar)	1
T _{ent} (°C)	181,51693
T_{sort} (°C)	154,87642
c _{pfums} (kJ/(kg·K))	1,1
flux màssic (kg/s)	11,726
Q intercanviada (kW)	343,62525

AIGUA	
P (bar)	0,2
T _{aigua} (°C)	60
h _{vapor saturat} (kJ/kg)	2609,7
h _{líquid saturat} (kJ/kg)	251,09
flux màssic (kg/s)	0,14568973

Fig. A.3___Taules del càlcul de l'aprofitador de calor dels fums

A.4 Càlcul del ventilador per l'aire i el fum

El ventilador ha de moure 8,66 Nm³/s. Per calcular la seva potència s'utilitza la referència bibliogràfica [7].

P _v	16,01	Potència del ventilador (kW)
Q	8,66	Cabal a moure (m ³ /s)
p _i	192	pressió d'impulsió (mm H ₂ O)

Fig. A.4___Taula del càlcul de la potència del ventilador

Així doncs, es té que el ventilador ha de tenir una potència de 16 kW per tal de moure l'aire i els fums per la instal·lació.



B. Plànols i esquemes

B.1 Esquema de la instal·lació

A la figura B.1. es pot observar l'esquema general del funcionament intern de la central.

Fent un seguiment al fluid aire-fums es pot veure com l'aire entra al circuit de tubs a temperatura i pressió ambientals, s'escalfa a l'aprofitador de la calor dels fums entrant en contacte primer amb un feix de tubs pels quals hi circula aigua, després en contacte amb Dowtherm-A i per últim amb mercuri. L'aire s'escalfa per tal de poder obtenir una temperatura de flama més elevada a la caldera i així poder generar més energia elèctrica.

A la caldera l'aire escalfat entra en contacte amb els fums i es produeix l'ignició de la combustió gràcies al cremador de gas. La combustió provoca una sèrie de reaccions químiques comentades a l'apartat 6.2 de la memòria i es formen els fums de la combustió. Aquests intercanvien calor amb el primer cicle de Rankine, el de mercuri, i surten de la caldera encara a molta temperatura per un altre entramat de tubs entrant a l'aprofitador de la calor dels fums. Aquí cedeixen calor als fluids tèrmics anteriorment esmentats però ara en sentit contrari (primer mercuri, després Dowtherm-A i per últim aigua) i aquests transporten la calor cap a l'aire de l'entrada per tal d'escalfar-lo.

Un cop els fums surten de l'aprofitador encara mantenen una temperatura força alta que es pot aprofitar i per tant es dirigeixen cap a l'assegador on ajuden a eixugar els fums. Finalment, passen pel depurador de fums on són tractats per tal de ser abocats a l'atmosfera.



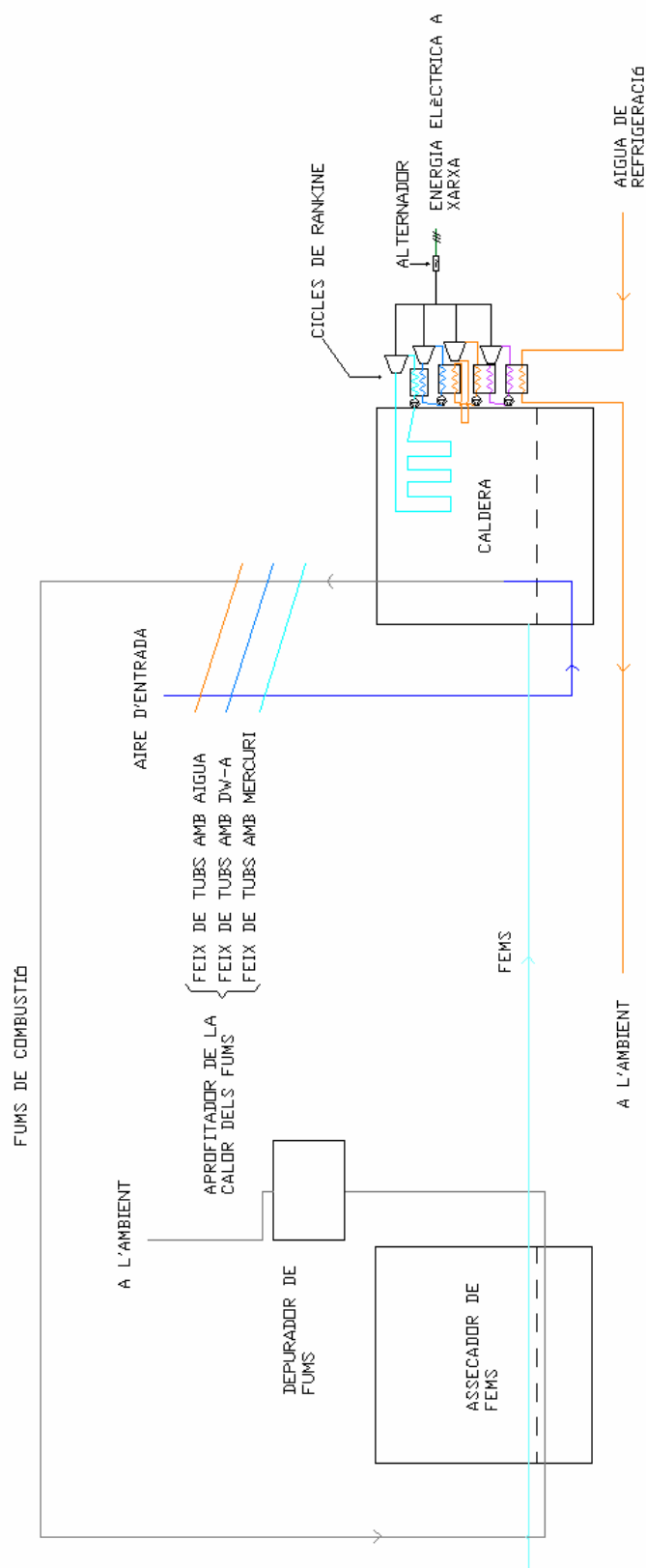


Fig. B.1___Esquema general de la instal·lació



A l'esquema anterior també es poden apreciar els quatre cicles de Rankine encadenats.

La combustió a la caldera produeix uns fums a una temperatura de flama molt elevada que s'encarreguen de transferir l'energia en forma de calor cap al mercuri, primer fluid tèrmic dels cicles de Rankine. El mercuri s'escalfa a la caldera i passa per la turbina on perd energia tèrmica que es transforma en energia mecànica. Posteriorment el mercuri entra a l'intercanviador de calor on transmet part de la seva energia cap al següent fluid tèrmic, el Dowtherm-A. El Dowtherm-A escalfat es dirigeix cap a la segona turbina on perd energia que aquesta transfereix al seu eix. A continuació el Dowtherm-A segueix el seu camí passant per un altre intercanviador on transfereix part de la seva energia al següent cicle de Rankine, pel qual circula aigua. L'aigua, a més d'absorbir l'energia transferida pel Dowtherm-A, rep part de l'energia de la combustió de la caldera perquè necessita reescalfar-se per tal de no tenir problemes d'aparició de líquid a l'interior de la turbina. La tercera turbina també extreu energia del fluid tèrmic a l'igual que les altres i la transforma en energia mecànica. A la sortida de la turbina el vapor d'aigua cedeix energia en un nou intercanviador al següent fluid tèrmic, el R-365mfc. Aquest, a l'igual que els altres perd energia a la quarta turbina i posteriorment dissipa calor a l'aigua de refrigeració, possiblement aigua d'un riu on es perd l'excedent d'energia no aprofitada.

Els eixos de les turbines estan sincronitzats per tal de transmetre el seu moviment a l'alternador el qual s'encarrega de transformar l'energia mecànica provinent del gir dels eixos en energia elèctrica a la freqüència i voltatge necessaris per tal de connectar-se a la xarxa elèctrica.



B.2 Detall de l'aprofitador de calor de fums

En aquest plànol es pot observar un detall de l'aprofitador de calor dels fums per escalfar l'aire d'entrada de la caldera.

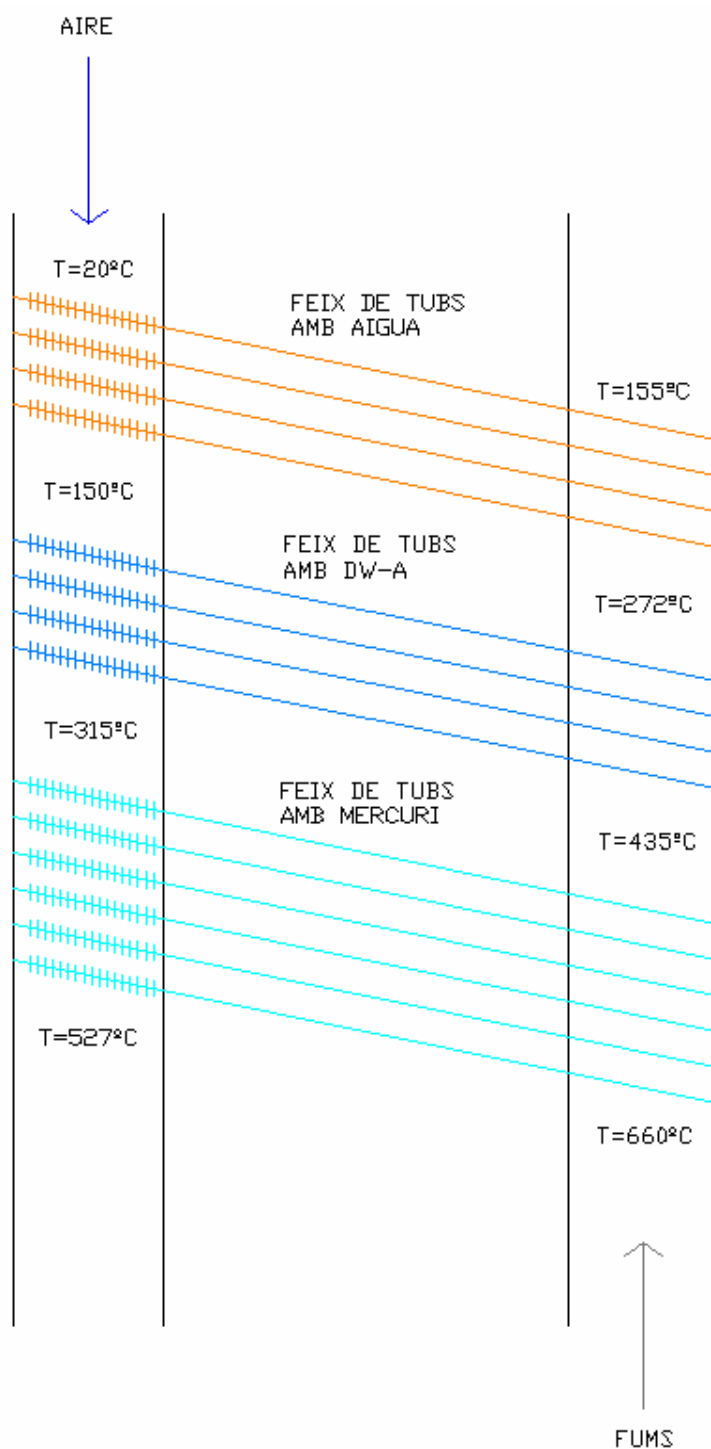


Fig. B.2___Aprofitador de la calor dels fums



L'aprofitador de la calor dels fums consisteix en un entramat de tubs que s'encarreguen, mitjançant uns fluids tèrmics, de transferir l'energia dels fums que surten de la caldera i que es troben a alta temperatura cap a l'aire a temperatura ambient que es dirigeix cap a la caldera.

L'aire es capta de l'ambient, considerat a 20°C i pressió atmosfèrica, i és empès per un ventilador cap a l'entrada de la caldera. En aquest camí primer entra en contacte amb tubs que contenen aigua i que s'encarreguen d'escalfar l'aire en quatre passos fins a una temperatura de 150°C. Després l'aire entra en contacte amb una sèrie de tubs que contenen Dowtherm-A i que en 4 passos escalfen l'aire fins a 315°C. Per últim, els tubs que contenen mercuri escalfen l'aire fins a 527°C en 6 passos, temperatura a la qual l'aire entra a la caldera. Tot aquest escalfament de l'aire, realitzat per l'anomenat mètode del termosifó, s'ha produït amb tubs aletejats que permeten una millor transferència de la calor que no pas si fossin llisos.

Per altra banda, al costat del fums, aquests surten a una temperatura de 660°C de la caldera després d'haver cedit gran part de la calor obtinguda en la combustió al mercuri, fluid tèrmic del primer cicle de Rankine. En el seu camí primer entren en contacte amb els tubs que contenen mercuri i cedeixen calor fins a quedar-se a una temperatura de 433°C. Més tard disminueixen la seva temperatura fins a 273°C degut a que cedeixen calor al tubs que contenen Dowtherm-A. Per últim, els fums surten de l'aprofitador de fums a 155°C degut a la cessió de calor cap als tubs que contenen aigua i com encara tenen una temperatura relativament elevada es dirigeixen cap a l'assecador dels fums on s'encarreguen d'assecar els fums que més tard es cremaran a la caldera. Cal dir que els tubs a la part que entren en contacte amb els fums de la combustió no són aletejats sinó que són llisos per tal de que no es produeixin acumulacions de cendra.

Com es pot apreciar a la figura de la pàgina anterior existeix una certa pendent ascendent dels tubs des de la part dels fums cap a la part de l'aire degut a que al mètode del termosifó no s'utilitza cap tipus d'element d'impulsió per fer circular els fluids tèrmics sinó que es juga amb els gradients de densitat entre l'estat líquid i gasós de les substàncies. Els fums s'encarreguen de vaporitzar els fluids tèrmics que es troben en estat líquid i per tant el fluid tèrmic en estat gasós tendeix a pujar cap a la part de l'aire. A l'entrar en contacte amb l'aire, molt més fred que els fums, tornen a liquidar i per tant per decantació flueixen cap a la part dels fums.

Per tant, els fluid tèrmics actuen com a transportadors d'energia però sense consumir-ne res.



B.3 Diagrama de fluxos

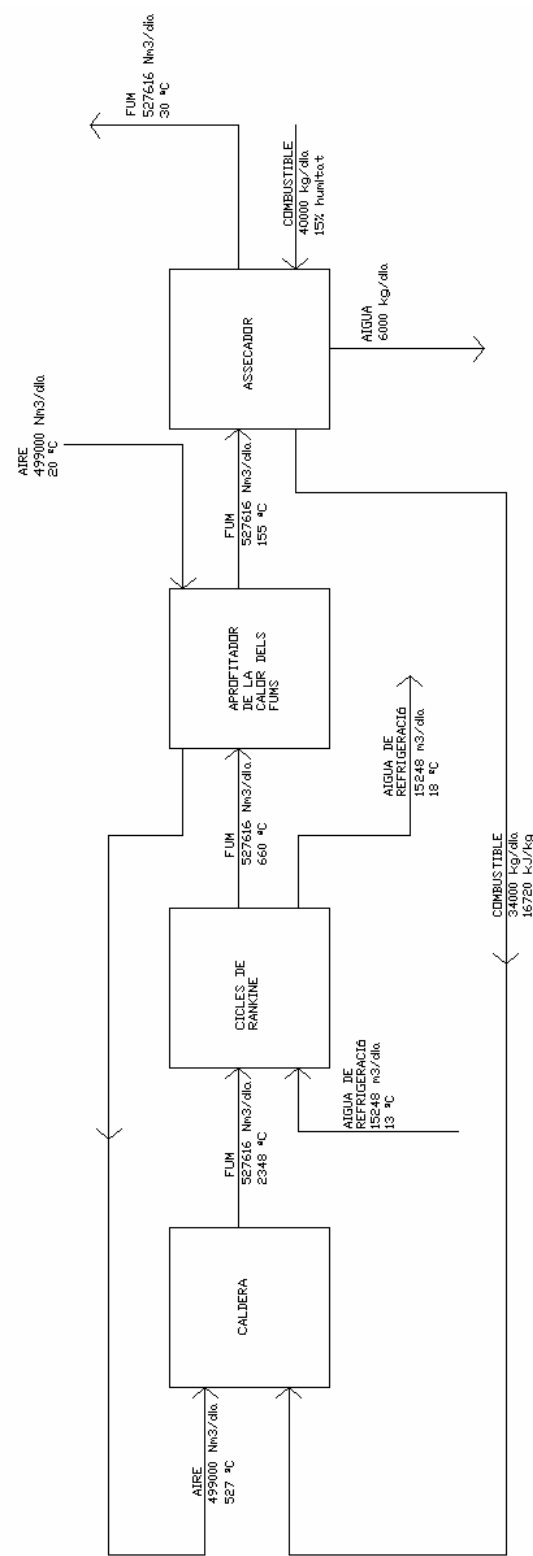


Fig. B.3__Diagrama de fluxos



A la figura B.3 es troba dibuixat un diagrama de fluxos de la instal·lació. Es poden veure els fluxos dels principals fluids que hi intervenen. Cal remarcar l'utilització d'un flux elevat d'aigua de riu per dissipar l'energia romanent a l'últim cicle de Rankine. També és important puntualitzar que l'aigua que s'extreu dels fons a l'assecador és bruta i caldrà tractar-la.

